

# 1. PENDAHULUAN

Hukum Fourier tentang konduksi kalor :

$$q = -k \cdot A \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots (1.1)$$

Dengan :

q = laju perpindahan kalor (W)

$\frac{\partial T}{\partial x}$  = gradien suhu ke arah perpindahan kalor ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )

K = konstanta positif, yang disebut dengan konduktivitas panas atau kehantaran termal dari benda tersebut ( $\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )  
(Untuk berbagai bahan nilai k dapat dilihat dalam **Lampiran 1**)

A = luas penampang, yaitu luas yang tegak lurus terhadap arah perpindahan ( $\text{m}^2$ )

Yang menyebabkan terjadinya pindah panas secara konduksi atau hantaran adalah landaian suhu (gradien suhu, temperatur gradient) perpindahan energi panas terjadi dari bagian tempat bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah.

Pada pembicaraan mengenai pindah panas secara konveksi (-ilian), rumus yang sangat pokok adalah hukum Newton tentang pendinginan, sebagai berikut :

$$q = h \cdot A \cdot (T_w - T_{\infty}) \dots\dots\dots (1.2)$$

Dengan :

q = laju perpindahan kalor (W)

h = koefisien perpindahan kalor konveksi ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

A = luas permukaan ( $\text{m}^2$ )

$T_{\infty}$  = suhu fluida ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_w$  = suhu palt atau suhu dinding ( $^{\circ}\text{C}$ )

Pada rumus (1.2) tersebut ,  $T_w$  menunjukkan nilai suhu permukaan, sedangkan  $T_\infty$  menunjukkan suhu arus bebas. Sedangkan nilai h dapat dilihat pada

**Lampiran 2.**

Pada pindah panas secara radiasi, rumus yang sangat terkenal adalah hukum Stefan-Boltzmann, dengan persamaan sebagai berikut :

$$q_{pancaran} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \dots\dots\dots (1.3)$$

Rumus (1.3) tersebut hanya berlaku pada benda hitam (*Blackbody*), bahwa benda hitam akan memancarkan energi dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat suhu absolut benda itu dan berbanding langsung dengan luas permukaan. Pada rumus tersebut,  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzmann, yang nilainya sebesar  $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  . Adapun A merupakan luas permukaan ( $\text{m}^2$ ), dan T adalah suhu absolut ( $^\circ\text{K}$ ). Sedangkan pertukaran radiasi netto antara 2 permukaan hitam sebanding dengan perbandingan suhu absolut pangkat empat, seperti pada persamaan dibawah ini :

$$\frac{q_{pancaran\ netto}}{A} \propto \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (1.4)$$

Contoh soal :

**Contoh 1. Konduksi Melalui Plat.**

Salah satu permukaan sebuah plat tembaga yang tebalnya 5 cm mempunyai suhu tetap  $380 \text{ }^\circ\text{C}$ , sedangkan suhu permukaan yang sebelah lagi dijaga tetap  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ . Berapa kalor yang berpindah melintasi lempeng itu ?

Jawab ...

Diketahui konduktivitas termal tembaga adalah  $370 \text{ W/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$  .

Hukum Fourier (Persamaan 1.1).

$$q = -k \cdot A \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\frac{q}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\frac{q}{A} = -370 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \times \frac{(95 - 380)^\circ C}{5 \cdot 10^{-2} m}$$

$$\frac{q}{A} = 2.109.000 \frac{W}{m^2}$$

$$\frac{q}{A} = \mathbf{2,1 \text{ MW/m}^2}$$

### **Contoh 2. Perhitungan Konveksi.**

Udara pada suhu  $23^\circ C$  bertiup diatas plat panas berukuran (60 x 80) cm. Suhu plat dijaga tetap  $300^\circ C$ . Koefisien perpindahan kalor konveksi adalah  $20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ C$ . Hitung berapa nilai perpindahan kalornya !

Jawab ...

Hukum newton tentang pendinginan :

$$q = h \cdot A \cdot (T_w - T_\infty)$$

$$q = 20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ C \cdot (0,6 \times 0,8) m^2 \cdot (300 - 23)^\circ C$$

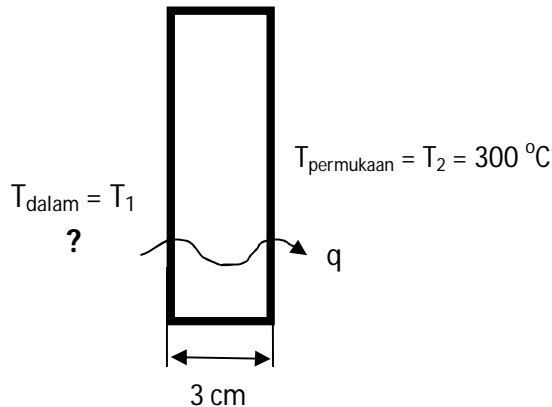
$$q = 2.659,2 \text{ W}$$

$$q = \mathbf{2,659 \text{ KW}}$$

### **Contoh 3. Perpindahan Kalor Beragam Cara.**

Jika plat pada Contoh 2 mempunyai konduktivitas panas  $73 \text{ W/m} \cdot ^\circ C$  yang tebalnya 3 cm, dan kehilangan kalor dari permukaan plat karena radiasi adalah 350 W, hitunglah suhu sisi plat bagian dalam !

Jawab ...



**Gambar 1.1.** Perpindahan Kalor di dalam Plat

Kalor yang dihantarkan melalui plat mesti sama dengan kehilangan kalor karena konveksi dan radiasi.

$$q_{kond} = q_{konv} + q_{rad}$$

$$-k \cdot A \frac{\partial T}{\partial x} = 2.659,2 \text{ W} + 350 \text{ W}$$

$$-k \cdot A \frac{\partial T}{\partial x} = 3.009,2 \text{ W}$$

Dalam hal ini

$$\partial x = 3 \text{ cm} = 0,03 \text{ m}$$

$$A = (0,6 \times 0,8) \text{ m}^2$$

$$K = 73 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\partial T = \frac{3.009,2 \text{ W} \times \partial x}{-k \cdot A}$$

$$\partial T = \frac{3.009,2 \text{ W} \times 0,03 \text{ m}}{-73 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} \times (0,6 \times 0,8) \text{ m}^2}$$

$$\partial T = -2,58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sehingga,

$$\text{suhu plat bag. dalam} = \text{suhu permukaan plat} - \partial T$$

$$\text{suhu plat bag. dalam} = 300^\circ\text{C} - (-2,58)^\circ\text{C}$$

suhu plat bag. dalam = **302,58 °C**

**Contoh 4. Perpindahan Kalor Radiasi.**

Plat A dan plat B merupakan dua plat tak berhingga (*blackbody*). Suhu plat A adalah 700 °C dan suhu plat B adalah 450 °C. Pada kedua plat tersebut saling terjadi perpindahan kalor secara radiasi. Hitung perpindahan kalor netto per satuan luas !

Jawab ...

$$\text{suhu mutlak plat A} = (700 + 273)^\circ\text{K} = 973^\circ\text{K}$$

$$\text{suhu mutlak plat B} = (450 + 273)^\circ\text{K} = 723^\circ\text{K}$$

Dengan menggunakan Persamaan (1.4)

$$\frac{q_{\text{pancaran netto}}}{A} = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\frac{q_{\text{pancaran netto}}}{A} = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot (973^4 - 723^4) \text{K}^4$$

$$\frac{q_{\text{pancaran netto}}}{A} = 3,53207 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

$$\frac{q_{\text{pancaran netto}}}{A} = \mathbf{35,32 \text{ KW/m}^2}$$

## 2. KONDUKSI TUNAK PADA DINDING DATAR

Besarnya laju aliran energi panas pada dinding datar dengan ketebalan  $\Delta x$  dan luas perpindahan panas ( $A$ ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$q = \frac{k.A}{\Delta x} (T_1 - T_2) \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan :

$q$  = laju perpindahan kalor (W)

$K$  = konstanta positif, yang disebut dengan konduktivitas panas atau kehantaran termal dari benda tersebut ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

(Untuk berbagai bahan nilai  $k$  dapat dilihat dalam **Lampiran 1**)

$A$  = luas penampang perpindahan panas ( $m^2$ )

$T_1$  = suhu dinding (sisi) yang relatif lebih tinggi ( $^\circ C$ )

$T_2$  = suhu dinding (sisi) yang relatif lebih rendah ( $^\circ C$ )

$\Delta X$  = ketebalan dinding (m)

Laju perpindahan kalordapat dipandang sebagai aliran, dengan demikian dapat disusun dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$aliran\ kalor = \frac{beda\ potensial\ termal}{tahanan\ termal} \dots\dots\dots (2.2)$$

Pada persamaan (2.1) besarnya beda potensial termal dapat dihitung melalui selisih panas yang terjadi ( $T_1 - T_2$ ), sedangkan untuk tahanan termal dapat dihitung melalui perbandingan ketebalan dinding terhadap perkalian konduktivitas termal dengan luas perpindahan panas ( $\frac{\Delta x}{K.A}$ ), sehingga persamaan (2.1) dapat ditulis dengan persamaan berikut :

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{k.A}{\Delta x}} \dots\dots\dots (2.3)$$

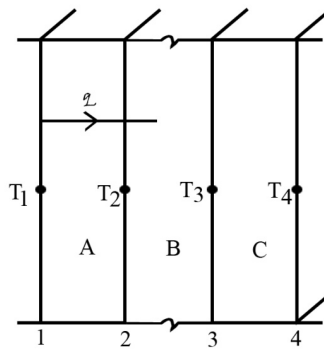
Jadi, analogi listriknya adalah sebagai berikut :



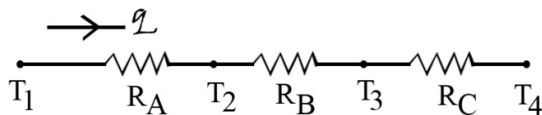
**Gambar 2.1. Analogi Aliran Listrik**

$$R = \frac{\Delta x}{k.A} \dots\dots\dots (2.4)$$

Jika dalam sistem tersebut terdapat lebih dari 1 macam bahan (misalnya dinding berlapis rangkap) seperti pada Gambar 2.2, maka analogi aliran listriknya seperti pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.2. Sistem Dinding Lapis Rangkap**



### Gambar 2.3. Analogi Aliran Listrik Lapis Rangkap

$$R_A = \frac{\Delta x_A}{K_{A.A}} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$R_B = \frac{\Delta x_B}{K_{B.A}} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$R_C = \frac{\Delta x_C}{K_{C.A}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Sehingga :

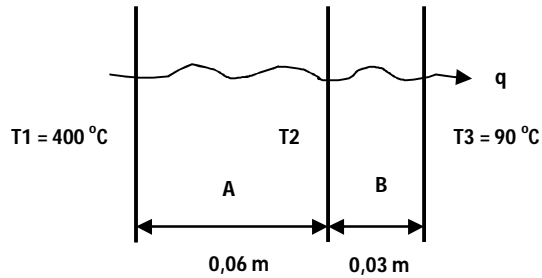
$$q = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{\Delta x_A}{K_{A.A}} + \frac{\Delta x_B}{K_{B.A}} + \frac{\Delta x_C}{K_{C.A}}} \dots\dots\dots (2.3)$$

#### Contoh :

Suatu dinding datar dari baja dipakai untuk menyekat ruang panas. Suhu baja pada sisi yang berhubungan dengan ruang panas adalah  $400^\circ$ . Sedangkan tebal baja adalah 0,06 m. Pada sisi luar, dinding baja tersebut masih dilapisi dengan isolasi asbes setebal 0,03 m. Suhu dinding asbes sebelah luar adalah  $90^\circ\text{C}$ . Luas perpindahan panas adalah  $25\text{ m}^2$ . Konduktivitas termal baja dan asbes berturut-turut adalah  $19\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$  dan  $0,2\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ . Hitung laju aliran panas (KW) !



Jawab ...



Gambar 2.4. Analogi Perpindahan Panas 2 benda

$$q = \frac{(T_1 - T_3)}{\frac{\Delta x_A}{K_A \cdot A} + \frac{\Delta x_B}{K_B \cdot A}}$$

$$q = \frac{(400 - 90)^\circ C}{\frac{0,06 \text{ m}}{19 \text{ W/m} \cdot ^\circ C \times 25 \text{ m}^2} + \frac{0,03 \text{ m}}{0,2 \text{ W/m} \cdot ^\circ C \times 25 \text{ m}^2}}$$

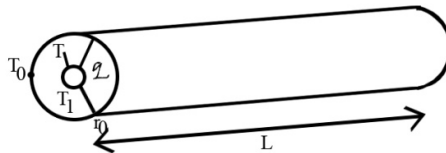
$$q = \frac{310}{(1,263 \times 10^{-4}) + (6 \times 10^{-3})} \text{ W}$$

$$q = 50.601,374 \text{ W}$$

$$q = \mathbf{50,6 \text{ KW}}$$

### 3. KONDUKSI TUNAK PADA SILINDER

Silinder panjang, dengan jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ), serta panjang ( $L$ ) seperti pada Gambar (3.1) mengalami perbedaan suhu ( $T_i - T_o$ ).



**Gambar 3.1. Sistem Radial Silinder**

Silinder yang panjangnya sangat besar dibandingkan dengan diameternya dapat diandaikan bahwa aliran kalor berlangsung menurut arah radial. Luas bidang aliran kalor dalam sistem silinder adalah :

$$A_r = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Dengan demikian, maka hukum Fourier menjadi sebagai berikut ...

$$q_r = -k \cdot A_r \frac{\partial T}{\partial r}$$

$$q_r = -2 \cdot k \cdot \pi \cdot r \cdot L \frac{\partial T}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

Kondisi batas :

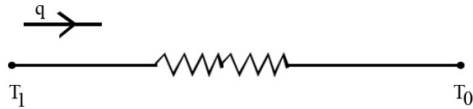
$$T = T_i \text{ pada } r = r_i$$

$$T = T_o \text{ pada } r = r_o$$

Maka penyelesaian persamaan (3.2) adalah sebagai berikut :

$$q_r = - \frac{2.k.\pi.L.(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \dots\dots\dots (3.3)$$

Adapun bentuk analogi listriknya adalah sebagai berikut :

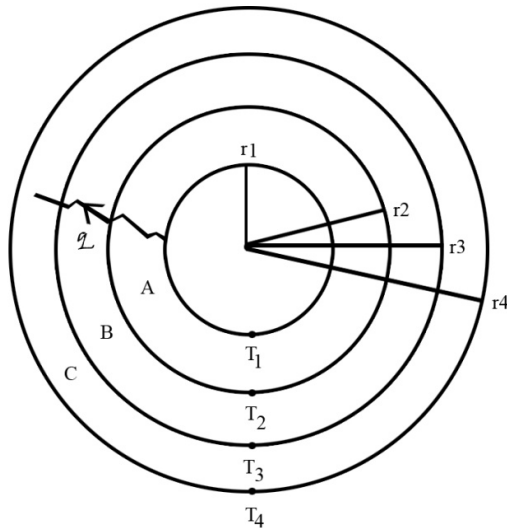


**Gambar 3.2. Analogi Bentuk Aliran Listrik Kondisi Tunak pada Silinder**

Sehingga persamaan (3.3) dinyatakan dalam bentuk :

$$q = - \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2.\pi.k.L}} \dots\dots\dots (3.4)$$

Pada sistem silinder 3 lapis seperti pada Gambar 3.3, maka analogi listriknya adalah sebagai berikut :



**Gambar 3.3. Analogi Bentuk Aliran Listrik Kondisi Tunak pada Silinder 3 Lapis**

$$R_A = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_A \cdot L} \quad R_B = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_B \cdot L} \quad R_C = \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi \cdot k_C \cdot L}$$

Maka laju perpindahan panas yang terjadi adalah :

$$q_r = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_C} \dots\dots\dots (3.5)$$

**Contoh 1 :**

Silinder baja karbon dengan konduktivitas termal  $43 \text{ W/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$  mempunyai jari-jari dalam 2 cm, jari-jari luar 4 cm, dan panjang 10 m. Suhu dinding dalam adalah  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , sedangkan suhu dinding luar adalah  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hitunglah laju kalor yang mengalir pada silinder tersebut !

Jawab ...



$$10 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

$$q = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi \cdot k \cdot L}}$$

$$q = \frac{(400 - 100)^\circ\text{C}}{\frac{\ln(4 \text{ cm}/2 \text{ cm})}{2 \times 3,14 \times 43 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C} \times 100 \text{ cm}}}$$

$$q = \frac{300^\circ\text{C}}{2,56553 \times 10^{-4}} \text{ W}$$

$$q = 1169348,9 \text{ W}$$

$$q = \mathbf{1,169 \text{ MW}}$$

### Contoh 2 :

Sebuah tabung berdinding tebal terbuat dari baja tahan karat dengan konduktivitas termal  $19 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  dengan jari-jari dalam 3 cm dan jari-jari luar 5 cm. Tabung tersebut dibalut dengan isolasi asbes setebal 2 cm ( $k = 0,2 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ ). Jika suhu dinding dalam pipa tersebut  $500^\circ\text{C}$  dan suhu dinding luar isolasi  $100^\circ\text{C}$ , hitung laju kalor yang mengalir tiap 1 m panjang tabung ! (W/m)

Jawab ...

$$q_r = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln(r_2^2/r_1)}{2\pi \cdot k_{\text{baja}} \cdot L} + \frac{\ln(r_3^2/r_2)}{2\pi \cdot k_{\text{asbes}} \cdot L}}$$

Kalor yang mengalir tiap 1 m panjang adalah :

$$\frac{q_r}{L} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln(r_2^2/r_1)}{2\pi \cdot k_{\text{baja}}} + \frac{\ln(r_3^2/r_2)}{2\pi \cdot k_{\text{asbes}}}}$$

$$\frac{q_r}{L} = \frac{(500-100)^\circ\text{C}}{\frac{\text{Ln}(5\text{ cm}/3\text{ cm})}{2 \times 3,14 \times 19\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}} + \frac{\text{Ln}(r_3/r_2)}{2 \times 3,14 \times 0,2\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}}}$$

$$\frac{q_r}{L} = \frac{400}{0,272035} \text{ W/m}$$

$$\frac{q_r}{L} = 1470,3986 \text{ W/m}$$

$$\frac{q_r}{L} = \mathbf{1470,4 \text{ W/m}}$$

#### 4. KONDUKSI TUNAK PADA BOLA

Suatu dinding berbentuk bola, dengan jari-jari dinding dalam adalah  $r_i$  dan sedangkan jari-jari dinding luar adalah  $r_o$  dengan koefisien perpindahan kalor konduksi adalah  $k$ , maka tahanan termal  $R_{th}$  yang terjadi adalah senbagai berikut :

$$R_{th} = \frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o}}{4 \cdot \pi \cdot k} \dots\dots\dots (4.1)$$

Dengan suhu dinding dalam adalah  $T_i$  dan suhu dinding luar adalah  $T_o$ , maka besarnya laju aliran kalor adalah :

$$q = \frac{T_i - T_o}{R_{th}} \dots\dots\dots (4.2)$$

**Contoh :**

Tangki berberentuk bola yang terbuat dari baja memiliki konduktivitas termal ( $k$ )  $19 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  dengan jari-jari dalam ( $r_i$ )  $30 \text{ cm}$  dan jari-jari luar ( $r_o$ )  $32 \text{ cm}$ . Tangki tersebut berisi zat cair panas sehingga suhu dinding tangki bagian dalam ( $T_i$ ) menjadi  $80^\circ\text{C}$  dan suhu tangki bagian luar ( $T_o$ )  $30^\circ\text{C}$ . Hitunglah laju aliran kalor !

Jawab ...

$$R_{th} = \frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o}}{4 \cdot \pi \cdot k}$$

$$R_{th} = \frac{\frac{1}{30 \text{ cm}} - \frac{1}{32 \text{ cm}}}{4 \times 3,14 \times 19 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$R_{th} = 8,72559 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$q = \frac{T_i - T_o}{R_{th}}$$

$$q = \frac{(80 - 30) ^\circ\text{C}}{8,72559 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}}$$

$$q = 57.302,65 \text{ W} = \mathbf{57,3 \text{ kW}}$$



## 5. KONVEKSI DENGAN ANALOGI TAHANAN LISTRIK

Permukaan dinding dengan suhu  $T_w$  akan melepaskan kalor ke lingkungan dengan suhu  $T_\infty$ , yang besarnya laju aliran panas tersebut juga bergantung pada luas permukaan dinding dan koefisien perpindahan panas konveksi, dengan rumus :

$$q = h \cdot A (T_w - T_\infty) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

Dengan analogi tahanan listrik, maka persamaan (5.1) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$q = \frac{(T_w - T_\infty)}{\frac{1}{h \cdot A}} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

Dengan :

- q = laju aliran panas (W)
- h = koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
- A = luas perpindahan panas ( $m^2$ )
- $T_w$  = suhu permukaan dinding ( $^\circ C$ )
- $T_\infty$  = suhu lingkungan atau fluida ( $^\circ C$ )

### Contoh :

Suatu plat vertikal dengan suhu permukaan plat  $90^\circ C$  berada pada lingkungan udara bersuhu  $27^\circ C$ . Luas permukaan plat adalah  $3 m^2$ . koefisien perpindahan kalor konveksi adalah  $4,5 W/m^2 \cdot ^\circ C$ . Hitung laju perpindahan kalor !

Jawab ...

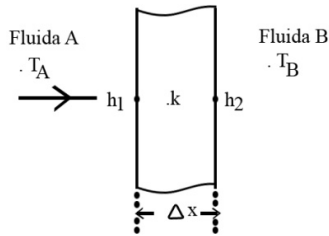
$$q = \frac{(T_w - T_\infty)}{\frac{1}{h \cdot A}}$$

$$q = \frac{(90 - 27)^{\circ}\text{C}}{\frac{1}{4,5 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \times 3 \text{ m}^2}}$$

$$q = \mathbf{850,5 \text{ Watt}}$$

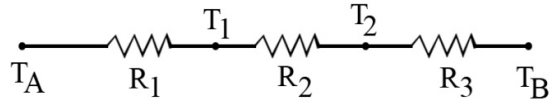
## 6. GABUNGAN KONDUKSI DAN KONVEKSI

Pada dinding datar, apabila terjadi peristiwa gabungan konduksi dan konveksi dengan ilustrasi pada Gambar (6.1)



**Gambar 6.1. Perpindahan Kalor Menyeluruh Melalui Dinding Datar**

maka analogi listriknya adalah :



Besarnya tahanan termal gabungan adalah :

$$R_{th} = \frac{1}{h_1 \cdot A} + \frac{\Delta X}{K \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A} \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

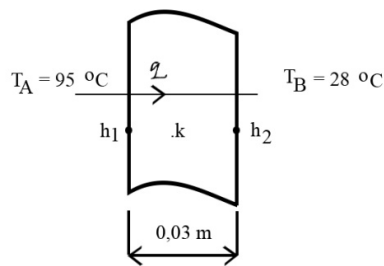
Besarnya laju kalor yang mengalir adalah :

$$q = \frac{T_A - T_B}{R_{th}} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

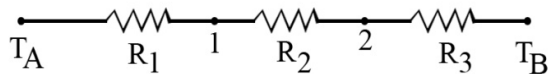
**Contoh :**

Ruang panas dengan suhu  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  disekat dengan plat vertical yang tebalnya  $0,03\text{ m}$ . suhu udara luar adalah  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Luas perpindahan panasnya adalah  $26\text{ m}^2$ . Koefisien perpindahan panas konveksi dari ruang panas ke plat adalah  $2500\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ . Koefisien perpindahan panas konveksi dari plat ke udara adalah  $4,5\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  dan koefisien perpindahan panas konduksi pada plat adalah  $16\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ . Hitung laju kalor yang mengalir dari ruang panas ke udara luar (kW) !

Jawab ...



Analogi listriknya :



Tahanan termal gabungan ...

$$R_{th} = \frac{1}{h_1 \cdot A} + \frac{\Delta X}{K \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A}$$

$$R_{th} = \frac{1}{2500\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C} \times 26\text{ m}^2} + \frac{0,03\text{ m}}{16\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C} \times 26\text{ m}^2} + \frac{1}{4,5\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C} \times 26\text{ m}^2}$$

$$R_{th} = (1,53846 \times 10^{-5} + 7,21153 \times 10^{-5} + 8,547 + 10^{-3})\text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

$$R_{th} = 8,6345 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Laju aliran kalor ...

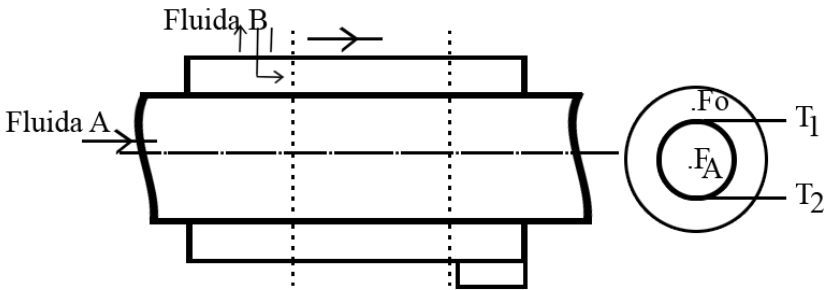
$$q = \frac{T_A - T_B}{R_{th}}$$

$$q = \frac{(95 - 28) \text{ }^\circ\text{C}}{8,6345 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}}$$

$$q = 7759,5614 \text{ W}$$

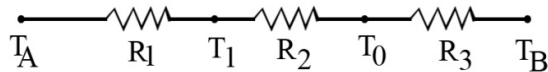
$$q = \mathbf{7,76 \text{ kW}}$$

Pada suatu silinder bolong (berlubang) yang terkena lingkungan konveksi di permukaan bagian dalam dan luar, seperti pada Gambar 6.2.



**Gambar 6.2. Perpindahan Kalor pada Silinder yang Terkena Lingkungan Konveksi di Permukaan Bagian Dalam dan Luar**

maka analogi listriknya adalah :



Dalam hal ini :

$$R_1 = \frac{1}{h_i \cdot A_i} = \frac{1}{h_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot L} \dots\dots\dots (6.3)$$

$$R_2 = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \dots\dots\dots (6.4)$$

$$R_3 = \frac{1}{h_o \cdot A_o} = \frac{1}{h_o \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot L} \dots\dots\dots (6.5)$$

Dengan :

- q = laju perpindahan kalor (W)
- h<sub>i</sub> = koefisien perpindahan kalor dari fluida A ke dinding silinder
- h<sub>o</sub> = koefisien perpindahan kalor dari dinding silinder ke fluida B
- k = koefisien perpindahan kalor konduksi pada silinder
- r<sub>i</sub> = jari-jari dinding silinder bagian dalam
- R<sub>o</sub> = jari-jari dinding silinder bagian luar
- L = panjang silinder

Dengan demikian, maka besarnya tahanan termal gabungan adalah :

$$R_{th-gab} = R_1 + R_2 + R_3 \dots\dots\dots (6.5)$$

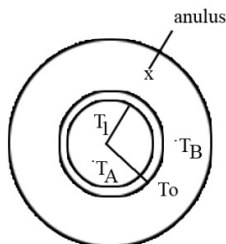
Untuk perpindahan kalor dari fluida A ke fluida B mempunyai laju sebagai berikut :

$$q = \frac{T_A - T_B}{R_{th-gab}} \dots\dots\dots (6.6)$$

**Contoh :**

Suatu silinder bolong (berlubang) mempunyai jari-jari dalam 0,04 m dan jari-jari luar 0,06 m. Pada silinder tersebut dilewatkan fluida panas dengan suhu 100 °C, sedangkan pada anulus (ruang diantara pipa yang bersumbu sama) dialiri dengan fluida bersuhu 38 °C. Panjang silinder adalah 4 m. koefisien perpindahan panas konveksi dari fluida ke dinding panas adalah 2600 W/m<sup>2</sup>.°C . Koefisien perpindahan panas konveksi dari dinding silinder ke fluida pada anulus 6 W/m<sup>2</sup>.°C , dan koefisien perpindahan panas konduksi pada silinder 35 W/m.°C . Hitung laju perpindahan panas yang terjadi !

Jawab ...



$$R_1 = \frac{1}{h_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot L}$$

$$R_1 = \frac{1}{2600 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} \times 2 \times 3,14 \times 0,04 \text{ m} \times 4 \text{ m}}$$

$$R_1 = 3,82583 \times 10^{-4} \text{ °C/W}$$

$$R_2 = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}$$

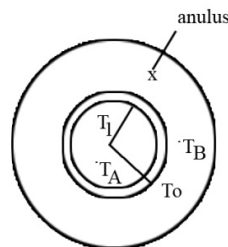
$$R_2 = \frac{\ln(6 \text{ m}/4 \text{ m})}{2 \times 3,14 \times 35 \text{ W/m} \cdot \text{°C} \times 4 \text{ m}}$$

$$R_2 = 4,60941 \times 10^{-4} \text{ °C/W}$$

$$R_3 = \frac{1}{h_o \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot L}$$

$$R_3 = \frac{1}{6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} \times 2 \times 3,14 \times 0,06 \text{ m} \times 4 \text{ m}}$$

$$R_3 = 0,1105242 \text{ °C/W}$$



$$R_{th-gab} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{th-gab} = (3,82583 \times 10^{-4} + 4,60941 \times 10^{-4} + 0,1105242) \text{ °C/W}$$

$$R_{th-gab} = 0,1113677 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$q = \frac{T_A - T_B}{R_{th-gab}}$$

$$q = \frac{(100 - 38) \text{ } ^\circ\text{C}}{0,1113677 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}}$$

$$q = \mathbf{556,7 \text{ Watt}}$$



## 7. SILINDER DENGAN SUMBER KALOR

Hubungan antara suhu pada pusat silinder ( $T_o$ ) terhadap suhu pada dinding silinder ( $T_w$ ), jari-jari silinder ( $R$ ), kalor yang dibangkitkan pada silinder tiap satuan volume ( $\dot{q}$ ), dan konduktivitas termal bahan silinder ( $k$ ), ditampilkan pada persamaan berikut :

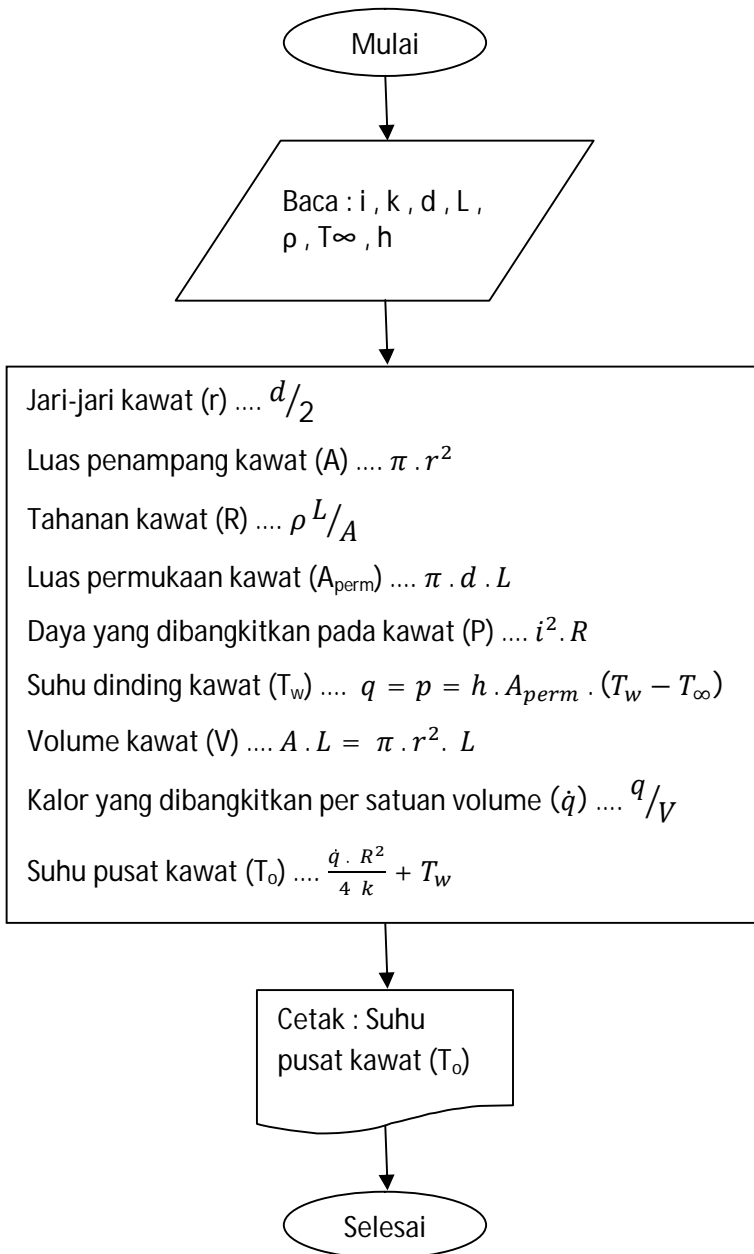
$$T_o = \frac{\dot{q} \cdot R^2}{4 k} + T_w \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

Diberikan contoh penyelesaian kasus dengan menggunakan diagram alir, sebagai berikut :

Kawat dialiri arus listrik (berarti kawat tersebut menjadi sumber kalor). Kawat tersebut berada pada lingkungan fluida, bila diketahui :

- Kuat arus listrik ( $I$ )
- Konduktivitas termal kawat ( $k$ )
- Diameter kawat ( $d$ )
- Panjang kawat ( $L$ )
- Resistivitas kawat ( $\rho$ )
- Suhu fluida ( $T_\infty$ )
- Koefisien perpindahan panas konveksi dari kawat ke fluida ( $h$ )

Maka, suhu pada pusat kawat ( $T_o$ ) dapat dihitung dengan mengikuti diagram alir sebagai berikut :



Gambar 7.1. Flow Chart Perhitungan Suhu Pusat Silinder

Contoh :

Arus listrik sebesar 150 A dilewatkan melalui sebuah kawat baja tahan karat ( $k = 19 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) yang berdiameter 4 mm. resistivitas baja dapat dianggap  $70 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ . Panjang kawat 1,5 m. kawat ini dibanamkan didalam zat cair pada suhu  $110^\circ\text{C}$  dengan koefisien perpindahan kalor konveksi adalah  $4 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Hitunglah suhu pusat kawat !

Jawab ...

**Step 1 ...**

$$r = d/2 = 4 \text{ mm}/2 = 2 \text{ mm} = 0,2 \text{ cm} = 0,002 \text{ m}$$

**Step 2 ...**

$$A = \pi \cdot r^2 = 3,14 \times (0,2 \text{ cm})^2 = 0,12566 \text{ cm}^2$$

**Step 3 ...**

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$R = 70 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \times \frac{150 \text{ cm}}{0,12566 \text{ cm}^2}$$

$$R = 0,0836 \Omega$$

**Step 4 ...**

$$A_{perm} = \pi \cdot d \cdot L$$

$$A_{perm} = 3,14 \times 4 \text{ mm} \times 1,5 \text{ m}$$

$$A_{perm} = 3,14 \times 0,004 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$$

$$A_{perm} = 0,0188495 \text{ m}^2$$

**Step 5 ...**

$$P = i^2 \cdot R$$

$$P = (150 \text{ A})^2 \cdot 0,0836 \Omega$$

$$P = 1881 \text{ W}$$

**Step 6 ...**

$$P = q = h \cdot A_{perm} \cdot (T_w - T_\infty)$$

$$1881 \text{ W} = 4 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \times 0,0188495 \text{ m}^2 \times (T_w - 110) ^\circ\text{C}$$

$$1881 \text{ W} = 4000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \times 0,0188495 \text{ m}^2 \times (T_w - 110) ^\circ\text{C}$$

$$1881 \text{ W} = 75,398 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} (T_w - 110) ^\circ\text{C}$$

$$1881 \text{ W} = 75,398 (T_w) \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} - 8393,78 \text{ W}$$

$$(1881 + 8393,78) \text{ W} = 75,398 (T_w) \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}}$$

$$10174,78 \text{ W} = 75,398 (T_w) \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}}$$

$$\frac{10174,78 \text{ W}}{75,398 \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}}} = T_w$$

$$T_w = 134,94761 ^\circ\text{C}$$

$$T_w = 135 ^\circ\text{C}$$

**Step 7 ...**

$$V = A \cdot L$$

$$V = 0,12566 \text{ cm}^2 \times 150 \text{ cm}$$

$$V = 18,849 \text{ cm}^3$$

$$V = 18,849 \text{ cm}^3 \times \frac{\text{m}^3}{10^6 \text{ cm}^3}$$

$$V = 18,849 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

**Step 8 ...**

$$\dot{q} = \frac{q}{V}$$

$$\dot{q} = \frac{1881 \text{ W}}{18,849 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\dot{q} = 99,793 \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

**Step 9 ...**

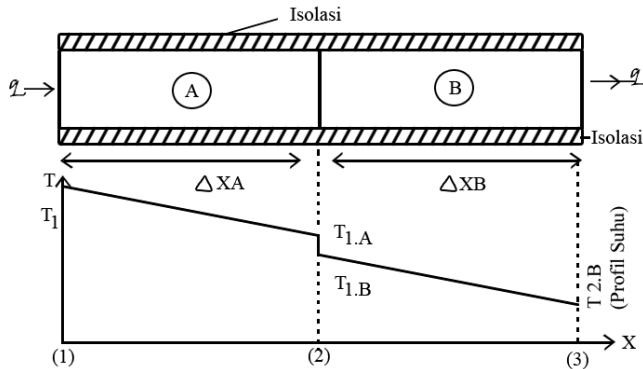
$$T_o = \frac{99,793 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \times (0,002 \text{ m})^2}{4 \times 19 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}} + 135 ^\circ\text{C}$$

$$T_o = (5,25 + 135) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_o = \mathbf{140,25 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

## 8. TAHANAN KONTAK TERMAL

Dua batang padat yang dihubungkan satu sama lain, sisi batang diisolasi, sehingga aliran kalor hanya berlangsung dalam arah aksial (sejajar poros), seperti pada Gambar 8.1.



**Gambar 8.1. Hubungan 2 Buah Batang dan Profil Suhu**

Pada Gambar 8.1 penurunan suhu dari \$T\_{2,A}\$ ke \$T\_{1,B}\$ dengan tiba-tiba tersebut terjadi pada bidang kontak ke dua batang tersebut, yang terjadi karena adanya tahanan kontak termal.

Pada bidang kontak terdapat tahanan kontak termal, sebab bagaimanapun juga ada faktor kekerasan sambungan, sehingga perlu energi panas untuk melangsungkan proses konduksi melalui gas yang terkurung pada ruang-ruang lowong yang terbentuk karena persinggungan. besarnya laju energi panas yang mengalir adalah :

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x_A}{k_A \cdot A} + \frac{1}{h_c \cdot A} + \frac{\Delta x_B}{k_B \cdot A}} \dots\dots\dots (8.1)$$

Pada persamaan (8,1) tersebut pembilang berupa potensial permal ( $\Delta T$ ) dan penyebut merupakan tahanan termal ( $\sum R_{th}$ ). Adapun beda suhu pada permukaan kontak adalah sebesar :

$$\Delta T_c = \frac{R_c}{\sum R_{th}} \times \Delta T \dots\dots\dots (8.2)$$

Dengan :

$$R_c = \text{tahanan kontak} = \frac{1}{h_c \cdot A}$$

**Contoh :**

Dua buah batang baja tahan karat memiliki diameter 4 cm, panjang 15 cm, dengan konduktan kontak ( $1/h_c$ ) sebesar  $5,28 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/W$ . Jika kedua permukaan ditekan satu sama lain dengan tekanan 50 atm, dan gabungan dua batang itu diberi beda suhu 100 °C, hitunglah aliran kalor aksial dan beda suhu di antara kedua permukaan kontak tersebut !

Konduktivitas termal baja =  $16,3 \text{ W}/m \cdot \text{°C}$

Jawab ...

Tahanan kontak ...

$$R_c = \frac{1}{h_c \cdot A}$$

$$R_c = \frac{1}{\left[ \frac{1}{5,28 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/W} \right] \times \left[ \pi \left( \frac{4}{2} \times 10^{-2} \text{ m} \right)^2 \right]}$$

$$R_c = \frac{5,28 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/W}{3,14 \times 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$R_c = 0,42 \text{ °C}/W$$

Tahanan termal sebuah batang baja ...

$$\frac{\Delta x_A}{k_A \cdot A} = \frac{\Delta x_B}{k_B \cdot A} = \frac{0,15 \text{ m}}{16,3 \text{ W/m} \cdot \text{°C} \times \left[ \pi \left( \frac{4}{2} \times 10^{-2} \text{ m} \right)^2 \right]} = 7,7323 \text{ °C/W}$$

Tahanan total termal ...

$$\sum R_{th} = \frac{\Delta x_A}{k_A \cdot A} + \frac{1}{h_c \cdot A} + \frac{\Delta x_B}{k_B \cdot A}$$

$$\sum R_{th} = (7,7323 + 0,42 + 7,7323) \text{ °C/W}$$

$$\sum R_{th} = 15,966 \text{ °C/W}$$

Aliran kalor ...

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\sum R_{th}}$$

$$q = \frac{100 \text{ °C}}{15,966 \text{ °C/W}}$$

$$q = 6,64 \text{ W}$$

Jadi, suhu pada tahanan kontak ...

$$\Delta T_c = \frac{R_c}{\sum R_{th}} \times \Delta T$$

$$\Delta T_c = \frac{0,42 \text{ °C/W}}{15,966 \text{ °C/W}} \times 100 \text{ °C}$$

$$\Delta T_c = 2,79 \text{ °C}$$



## 9. KONDUKSI TUNAK DIMENSI RANGKAP (FAKTOR BENTUK KONDUKSI PADA PIPA TERDALAM)

Dengan menggunakan faktor bentuk konduksi, maka besarnya laju aliran energy panas adalah :

$$q = k \cdot s \cdot \Delta T_{\text{menyeluruh}} \dots\dots\dots (9.1)$$

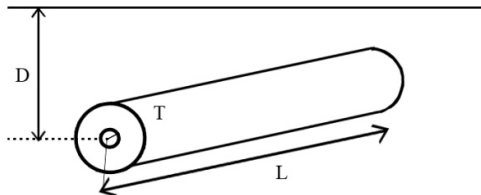
Dengan :

- q = kalor (W)
- k = konduktivitas termal ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
- S = faktor bentuk konduksi (m)
- $\Delta T_{\text{menyeluruh}}$  = perbedaan suhu ( $^\circ C$ )

Untuk silinder horizontal isothermal, dengan jari-jari r, dalam medium semi tak berhingga, dan mempunyai permukaan isothermal, serta memenuhi syarat  $L > r$ , maka berlaku nilai faktor S sebagai berikut :

$$s = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\cosh^{-1} (D/r)} \dots\dots\dots (9.2)$$

Adapun parameter L, D, dan r dapat dilihat pada Gambar 9.1.



**Gambar 9.1. Silinder Horizontal Isothermal**

Nilai  $\cosh^{-1} (D/r)$  merupakan inversi kosinus hiperbola ( $D/r$ ) yang didefinisikan seperti pada persamaan (9.3).

$$\cosh^{-1} x = \ln(x \pm \sqrt{x^2 - 1}) \quad \dots\dots\dots (9.3)$$

**Contoh :**

Sebuah pipa horizontal berdiameter 15 cm dan panjang 5 m ditanamkan di dalam tanah pada kedalaman 20 cm. Suhu dinding pipa 80 °C, dan suhu permukaan tanah 25 °C. andaikan konduktivitas termal tanah 0,8 W/m . °C , hitunglah kalor yang lepas dari pipa!

Jawab ...

Faktor bentuk S ...

$$s = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\cosh^{-1} (D/r)}$$

$$s = \frac{2 \times 3,14 \times 5 \text{ m}}{\cosh^{-1} (20 \text{ cm} / 7,5 \text{ cm})}$$

$$s = \frac{31,4 \text{ m}}{\cosh^{-1} (2,666)}$$

$$s = \frac{31,4 \text{ m}}{\ln (2,666666 \pm \sqrt{2,666666^2 - 1})}$$

$$s = \frac{31,4 \text{ m}}{\ln 5,138732}$$

$$s = \frac{31,4 \text{ m}}{1,636806}$$

$$s = 19,19 \text{ m}$$

Aliran Kalor ...

$$q = k \cdot s \cdot \Delta T_{\text{menyeluruh}}$$

$$q = 0,8 \text{ W/m} \cdot \text{°C} \times 19,19 \text{ m} \times (80 - 25) \text{ °C}$$

$$q = \mathbf{844,36 \text{ Watt}}$$

## 10. KONDUKSI TUNAK DIMENSI RANGKAP (FAKTOR BENTUK KONDUKSI PADA TANUR)

Pada dinding 3 dimensi, seperti pada tanur, digunakan factor bentuk yang berbeda-beda untuk menghitung aliran kalor dari bagian-bagian sudut dan tepi (rusuk). Jika semua dimensi dalam lebih besar dari 1/5 tebal dinding, maka digunakan persamaan (10.1), (10.2), dan (10.3).

$$S_{dinding} = \frac{A}{L} \dots\dots\dots (10.1)$$

$$S_{rusuk} = 0,54 \cdot D \dots\dots\dots (10.2)$$

$$S_{sudut} = 0,15 \cdot L \dots\dots\dots (10.1)$$

Dengan :

A = luas dinding (m<sup>2</sup>)

L = tebal dinding (m)

D = panjang rusuk (m)

**Contoh :**

Sebuah tanur kecil berbentuk kubus, dengan ukuran dalam 50 x 50 x 50 cm terbuat dari bata tahan api ( $k = 1,04 \text{ W/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ ) yang tebalnya 10 cm. bagian dalam tanur berada pada suhu 600 °C, sedangkan bagian luar tanur pada 55 °C. hitunglah kalor yang mengalir melalui dinding tanur !

Jawab ...

Faktor bentuk total dihitung dengan menjumlahkan factor-faktor bentuk dinding, rusuk, dan sudut.

$$S_{dinding} = \frac{A}{L}$$

$$S_{dinding} = \frac{(0,5 \times 0,5) m^2}{0,1 m}$$

$$S_{dinding} = 2,5 m$$

$$S_{rusuk} = 0,54 \cdot D$$

$$S_{rusuk} = 0,54 \times 0,5 m$$

$$S_{rusuk} = 0,27 m$$

$$S_{sudut} = 0,15 \cdot L$$

$$S_{sudut} = 0,15 \times 0,1 m$$

$$S_{sudut} = 0,015 m$$

Seluruhnya ada 6 dinding, 12 rusuk, dan 8 sudut. Sehingga factor bentuk totalnya adalah sebagai berikut :

$$S_{total} = 6 \cdot S_{dinding} + 12 \cdot S_{rusuk} + 8 \cdot S_{sudut}$$

$$S_{total} = 6 \times 2,5 m + 12 \times 0,27 m + 8 \times 0,015 m$$

$$S_{total} = 18,36 m$$

Aliran Kalor ...

$$q = k \cdot s \cdot \Delta T$$

$$q = 1,04 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \times 18,36 m (600 - 66)^\circ C$$

$$q = 10.406,448 W$$

$$q = \mathbf{10,406 kW}$$

## 11. KONDUKSI KEADAAN TAK TUNAK (SISTEM KAPASITOR-KALOR-TERGABUNG)

Istilah lain dari system kapasitor-kalor-tergabung adalah “tergumpal” (*lumped-heat-capacity method*). Adapun rumus yang dipakai adalah menggunakan persamaan (11.1).

$$\frac{T-T_{\infty}}{T_0-T_{\infty}} = e^{-[h.A/\rho.c.V] \tau} \dots\dots\dots (11.1)$$

Dengan :

- $T_0$  = suhu awal ( $^{\circ}\text{C}$ ), yaitu suhu pada saat  $\tau = 0$
- $T_{\infty}$  = suhu fluida lingkungan ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T$  = suhu yang dimaksud pada waktu  $\tau$  ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\tau$  = waktu (s)
- $h$  = koefisien pindah panas konveksi permukaan ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )
- $k$  = koefisien pindah panas konduksi pada objek ( $\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )
- $c$  = panas jenis objek
- $A$  = luas permukaan objek ( $\text{m}^2$ )
- $V$  = Volume objek ( $\text{m}^3$ )
- $\rho$  = densitas objek ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

untuk berlakunya persamaan (11.1), harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

$$\text{angka Biot} - Bi < 0,1 \dots\dots\dots (11.2)$$

Dengan :

$$Bi = \frac{h(V/A)}{k} \dots\dots\dots (11.3)$$

**Contoh :**

Sebuah bola baja dengan panas jenis  $0,46 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  dan koefisien perpindahan panas konduksi  $35 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ , berdiameter 5 cm. Pada mulanya berada pada suhu merata  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ , tiba-tiba ditempatkan pada suhu lingkungan terkendali  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Koefisien perpindahan kalor konveksi yang terjadi sebesar  $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Hitung berapa waktu yang diperlukan sampai bola itu mencapai suhu  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  !

Diketahui densitas baja =  $7800 \text{ kg/m}^3$

Jawab ...

Volume bola

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3$$

$$V = \frac{4}{3} \times 3,14 \times (0,025 \text{ m})^3$$

$$V = 6,54498 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Luas Permukaan bola

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

$$A = 4 \times 3,14 \times (0,025 \text{ m})^2$$

$$A = 7,85398 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Angka biot

$$Bi = \frac{h(V/A)}{k}$$

$$Bi = \frac{10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \times (6,54498 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / 7,85398 \times 10^{-3} \text{ m}^2)}{35 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$Bi = 2,38095 \times 10^{-3}$$

Karena nilai  $Bi < 0,1$ , maka berlaku rumus (11.1) "sistem tergumpal".

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = e^{-[h.A/\rho.c.V].\tau}$$

$$\frac{(150 - 100) \text{ }^{\circ}\text{C}}{(450 - 100) \text{ }^{\circ}\text{C}} = e^{-[h.A/\rho.c.V].\tau}$$

$$\frac{50}{350} = e^{-[h.A/\rho.c.V].\tau}$$

$$0,1428571 = e^{-[h.A/\rho.c.V].\tau}$$

$$\ln(0,1428571) = -[h.A/\rho.c.V].\tau$$

$$-[h.A/\rho.c.V].\tau = -1,9459101$$

$$[h.A/\rho.c.V].\tau = 1,9459101$$

$$\left[ \frac{(10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}) \times (7,85398 \times 10^{-3} \text{ m}^2)}{(7800 \text{ kg/m}^3) \times (0,46 \text{ kJ/kg} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}) \times (6,54498 \times 10^{-5} \text{ m}^3)} \right] \cdot \tau = 1,9459101$$

$$\tau = 5,8182682 \times 10^3 \text{ detik}$$

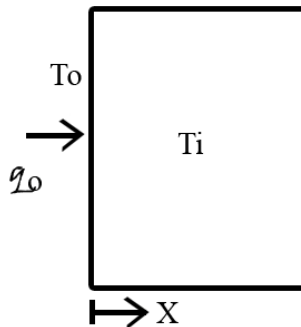
$$\tau = 5,8182682 \times 10^3 \text{ detik} \times \frac{1 \text{ jam}}{3600 \text{ detik}}$$

$$\tau = 1,6161856 \text{ jam}$$

$$\tau = \mathbf{1,6 \text{ jam}}$$

## 12. KONDUKSI KEADAAN TAK TUNAK (ALIRAN KALOR TRANSIEN DALAM BENDA PADAT SEMI-TAK-BERHINGGA)

Jika suatu benda padat semi-tak-berhingga yang berada pada suatu suhu awal  $T_i$ , kemudia suhu permukaannya dirubah secara mendadak menjadi  $T_o$ , maka aliran kalor pada setiap posisi  $x$  pada benda padat itu merupakan fungsi waktu, yang ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 12.1.



**Gambar 12.1. Ilustrasi Benda Padat Semi-Tak-Berhingga**

Persamaan yang dipakai dalam kasus ini diturunkan dari teknik Transformasi *Laplace* yang menghasilkan penyelesaian :

$$T_{(x,\tau)} = T_o + (T_i - T_o) \cdot \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot \tau}} \quad \dots\dots\dots (12.1)$$

Dengan :

$T_{(x,\tau)}$  = suhu pada posisi  $x$  dalam  $\tau$

$\alpha$  = difusifitas termal

$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot \tau}}$  = nilai galat (**Lampiran 3**)



**Contoh :**

Suatu blok besar baja dengan koefisien konduktifitas termal  $45 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  , dan difusivitas termal  $1,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  , pada mulanya berada pada suhu seragam  $35^\circ\text{C}$ . permukaannya diberi fluks kalor dengan tiba-tiba sehingga menaikkan suhu permukaan menjadi  $250^\circ\text{C}$ . Hitunglah suhu pada kedalaman  $2,5 \text{ cm}$  setelah  $0,5$  menit !

Jawab ...

$$\tau = 0,5 \text{ menit} = 30 \text{ detik}$$

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot \tau}} = \frac{0,025 \text{ m}}{2\sqrt{1,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \times 30 \text{ detik}}}$$

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot \tau}} = 0,61$$

Lihat lampiran 3 :

$$\text{erf } 0,60 = 0,60386$$

$$\dots\dots\dots \text{erf } 0,61 = 0,61164$$

$$\text{erf } 0,62 = 0,61941$$

maka,

$$T_{(x,\tau)} = T_o + (T_i - T_o) \cdot \text{erf } 0,61$$

$$T_{(x,\tau)} = 250^\circ\text{C} + (35^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C})(0,61164)$$

$$T_{(x,\tau)} = \mathbf{118,5^\circ\text{C}}$$

### 13. KONDISI – BATAS KONVEKSI

Pada kasus benda padat-semi-tak berhingga, kondisi batas konveksi berpijak dari pernyataan : “panas (kalor) yang dikonveksi ke permukaan – kalor yang dikonduksi ke permukaan”, yang menghasilkan persamaan :

$$\frac{T-T_1}{T_\infty-T_1} = 1 - \operatorname{erf} x - \left[ \exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2\alpha\tau}{k^2}\right) \right] \times \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(x + \frac{h\sqrt{\alpha\tau}}{k}\right) \right] \quad \dots\dots\dots (13.1)$$

Dengan :

$$X = \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}$$

$T_i$  = suhu awal benda padat

$T_\infty$  = nilai galat (Lampiran 3)

Penyelesaian persamaan (13.1) tersebut dapat disajikan dalam bentuk grafis **(Lampiran 4)**

#### Contoh :

Sebuah lempeng besar terbuat dari alumunium, berada pada suhu seragam 200 °C, tiba-tiba diberi lingkungan permukaan konveksi pada suhu 70 °C, dengan koefisien perpindahan kalor konveksi 525  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  . Hitunglah waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu 120 °C pada kedalaman 4 cm !

Koefisien perpindahan panas konduksi pada alumunium 215  $W/m \cdot ^\circ C$  , dan  $\alpha$  8,4 × 10<sup>-5</sup>  $m^2/s$  .

Jawab ...

Dengan menggunakan grafik pada Lampiran 4, kita masih harus melakukan prosedur iterasi karena waktu terdapat pada kedua variabel  $\frac{h\sqrt{\alpha\tau}}{k}$  dan  $\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}$  .

Kita cari nilai  $\tau$  sedemikian rupa, sehingga :

$$\frac{T - T_1}{T_\infty - T_1} = \frac{(120 - 200)^\circ\text{C}}{(70 - 200)^\circ\text{C}} = 0,615$$

Oleh karena itu kita coba beberapa nilai  $\tau$  dan kita dapatkan perbandingan suhu dari grafik Lampiran 4, sehingga terdapat kesesuaian dengan hasil hitungan diatas (yaitu 0,615). Iterasinya didaftarkan dibawah ini :

$\tau$ (detik)	$h\sqrt{\alpha\tau}/k$	$x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$\frac{T-T_1}{T_\infty-T_1}$ (Lampiran 4)
1000	0,708	0,069	0,41
3000	1,226	0,040	0,61
4000	1,416	0,035	0,68

Jadi, waktu yang diperlukan  $\approx$  **3000 detik**

## DAFTAR PUSTAKA

- Jasjfi, E..1991. *Perpindahan Kalor*. (Alih Bahasa dari : Heat Transfer, By Holman, J. P., Sixth Edition , 1986. Mc.Grew-Hill, Ltd.), penerbit Erlangga , Jakarta, 618p.
- Smith, J. Mond Van Ness, H. C. 19.. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, Mc.Graw Hill, Kogukueha.

Lampiran 1. Tabel Konduktivitas Termal

BAHAN	Konduktivitas Termal (K)	
	$W/m \cdot ^\circ C$	$BTU/h \cdot ft \cdot ^\circ F$
<i>Logam</i>		
Perak (murni)	410	237
Tembaga (murni)	385	223
Alumunium (murni)	202	117
Nikel (murni)	93	54
Besi (murni)	73	42
Baja karbon, 1 % C	43	25
Timbal (murni)	35	20,3
Baja krom-nikel (18% Cr, 8% Ni)	16,3	9,4
<i>Bukan Logam</i>		
Kuarsa (sejajar sumbu)	41,6	24
Magnesit	4,15	2,4
Marmar	2,08 – 2,94	1,2 – 1,7
Batu pasir	1,830	1,060
Kaca, jendela	0,780	0,450
Kayu maple atau ek	0,170	0,096
Serbuk gergaji	0,059	0,034
Wol kaca	0,038	0,022
<i>Zat Cair</i>		
Air raksa	8,210	4,740
Air	0,556	0,327
Amonia	0,540	0,312
Minyak lumas, SAE 50	0,147	0,085
Freon R12, $CCl_2F_2$	0,073	0,042
<i>Gas</i>		
Hidrogen	0,1750	0,1010
Helium	0,1410	0,0810
Udara	0,0240	0,0139
Uap air (jenuh)	0,0206	0,0119
Karbon dioksida	0,0146	0,0084

Lampiran 2. Tabel Konveksi

Modus	h	
	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$BTU/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$
<i>Konveksi Bebas, <math>\Delta T = 30^\circ C</math></i>		
Plat Vertikal, tinggi 0,3 m (1 ft) di udara	4,5	0,79
Silinder horizontal, diameter 5 cm, di udara	6,5	1,14
Silinder horizontal, diameter 2 cm, dalam air	890,0	157,00
<i>Konveksi paksa</i>		
Aliran udara 2 m/s di atas plat bujur sangkar 0,2 m	12	2,1
Aliran udara 35 m/s di atas plat bujur sangkar 0,75 m	75	13,2
Udara 2 atm mengalir di dalam tabung diameter 2,5 cm, kecepatan 10 m/s	65	11,4
Air 0,5 kg/s mengalir di dalam tabung 2,5 cm	3500	616
Aliran udara melintas silinder diameter 5 cm, kecepatan 50 m/s	180	32
<i>Air Mendidih</i>		
Dalam kolam atau bejana	2.500 – 35.000	440 – 6.200
Mengalir di dalam pipa	5.000 – 100.000	880 – 17.600
<i>Pengembunan Uap, 1 atm</i>		
Muka Vertikal	4.000 – 11.300	700 – 2.000
Di luar tabung horizontal	9.500 – 25.000	1.700 – 4.400

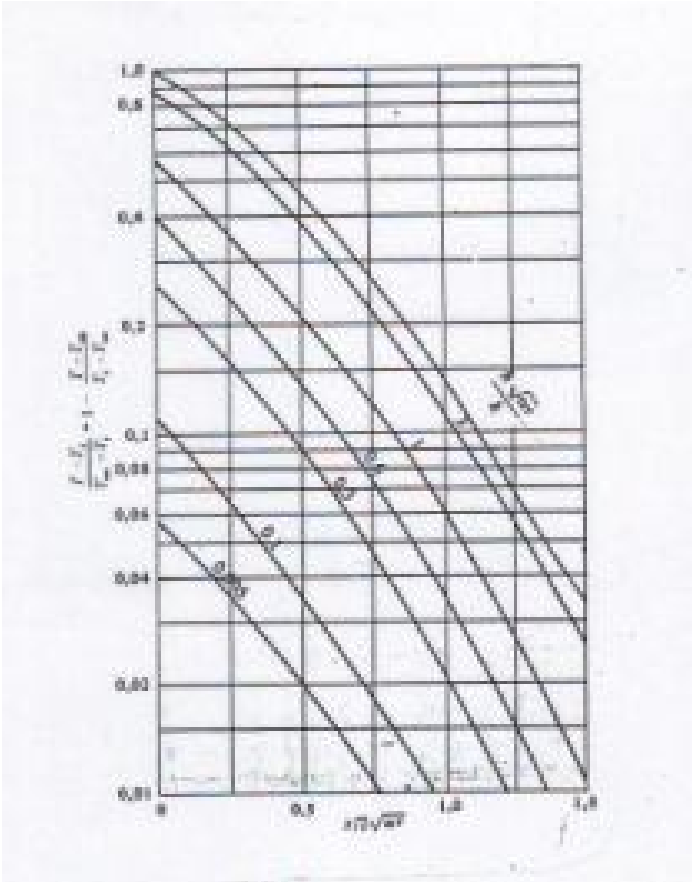
Lampiran 3. Tabel Nilai Galat

$x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$erf x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$erf x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$erf x/2\sqrt{\alpha\tau}$
0,00	0,00000	0,60	0,60386	1,20	0,91031
0,02	0,02256	0,62	0,61941	1,22	0,91533
0,04	0,04511	0,64	0,63459	1,24	0,92050
0,06	0,06762	0,66	0,64938	1,26	0,92524
0,08	0,09008	0,68	0,66278	1,28	0,92973
0,10	0,11246	0,70	0,67780	1,30	0,93401
0,12	0,13476	0,72	0,69143	1,32	0,93806
0,14	0,15695	0,74	0,70468	1,34	0,94141
0,16	0,17901	0,76	0,71754	1,36	0,94556
0,18	0,20094	0,78	0,73001	1,38	0,94902
0,20	0,22270	0,80	0,74210	1,40	0,95228
0,22	0,24430	0,82	0,75381	1,42	0,95538
0,24	0,26570	0,84	0,76514	1,44	0,95830
0,26	0,28690	0,86	0,77610	1,46	0,96105
0,28	0,30788	0,88	0,78669	1,48	0,96365
0,30	0,32863	0,90	0,79691	1,50	0,96610
0,32	0,34913	0,92	0,80677	1,52	0,96841
0,34	0,36936	0,94	0,81627	1,54	0,97059
0,36	0,38933	0,96	0,82542	1,56	0,97263
0,38	0,40901	0,98	0,83423	1,58	0,97455
0,40	0,42839	1,00	0,84270	1,60	0,97636
0,42	0,44749	1,02	0,85084	1,62	0,97804
0,44	0,46622	1,04	0,85865	1,64	0,97962
0,46	0,48466	1,06	0,86614	1,66	0,98110
0,48	0,50275	1,08	0,87333	1,68	0,98249
0,50	0,52050	1,10	0,88020	1,70	0,98379
0,52	0,53790	1,12	0,88079	1,72	0,98500
0,54	0,55494	1,14	0,89303	1,74	0,98613
0,56	0,57162	1,16	0,89910	1,76	0,98719
0,58	0,58792	1,18	0,90484	1,78	0,98817

$x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$erf x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$erf x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$x/2\sqrt{\alpha\tau}$	$erf x/2\sqrt{\alpha\tau}$
1,80	0,98909	1,96	0,99443	2,60	0,999764
1,82	0,98994	1,98	0,99489	2,70	0,999866
1,84	0,99074	2,00	0,99532	2,80	0,999925
1,86	0,99147	2,10	0,997020	2,90	0,999959
1,88	0,99216	2,20	0,998137	3,00	0,999978
1,90	0,99279	2,30	0,998857	3,20	0,999994
1,92	0,99338	2,40	0,999311	3,40	0,999998
1,94	0,99392	2,50	0,999593	3,60	1,000,000



Lampiran 4. Distribusi Suhu pada Benda Padat Semi-Tak-Berhingga dengan Kondisi Batas Konveksi



## TENTANG PENULIS



**Prof. Dr. Ir. Santosa, M.P.**

**NIP. 19640728 198903 1 003**

**Nomor Register Sertifikat Pendidik : 09110060168**

Santosa lahir di Sukoharjo, Jawa Tengah, pada bulan Juli tahun 1964. Santosa lulus SD di SD Manang Kec. Grogol, Kab. Sukoharjo pada tahun 1976, lulus SMP di SMPN II Surakarta tahun 1980, lulus SMA di SMAN III Surakarta tahun 1983. Santosa lulus kuliah Strata 1 (sarjana) dari Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, pada bulan Mei 1988. Santosa tercatat sebagai dosen di Fakultas Pertanian Universitas Andalas, di Padang, Sumatera Barat, terhitung mulai tanggal 01-03-1989. Santosa mendapat pendidikan S2 : Mekanisasi Pertanian (Lulus tahun 1993 : Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta). Santosa mendapat pendidikan S3 : Ilmu Keteknikan Pertanian (Lulus tahun 2002 : Institut Pertanian Bogor, Bogor). Sejak 01-12-2008, ia menjadi Guru Besar dalam bidang ilmu / mata kuliah Mekanisasi Pertanian.

Santosa telah menulis buku sebagai berikut : (a) Santosa. 1993. **"Aplikasi Program BASIC untuk Analisis Data Penelitian dalam Penyajian Model Matematika"**, ISBN : 979-533-137-X, Penerbit Andi Offset, Yogyakarta, (b) Santosa. 2005. **"Aplikasi Visual Basic 6.0 dan Visual Studio.Net 2003 dalam Bidang Teknik dan Pertanian"**, ISBN : 979-731-755-2, Penerbit Andi, Edisi I Cetakan I, Yogyakarta, (c) Santosa. 2010. **Evaluasi Finansial untuk Manager, dengan Software Komputer**. ISBN : 978-979-493-282-7. IPB Press. Bogor , (d) Santosa dan Isril Berd. 2010. **Simulasi dengan Komputer**. ISBN : 978-979-18379-3-4. Andalas University Press. Padang, dan (e) Santosa. 2012. **Buku Ajar Metodologi Penelitian**. ISBN : 978-979-493-414-2. IPB Press. Bogor.

Santosa pernah mendapat penghargaan sebagai berikut : (1) Dosen Teladan II Fakultas Pertanian Unand tahun 2003 (SK Dekan No. 088/VIII/KP/Faperta/Unand/2003 tgl. 1 Agustus 2003), (2) Dosen Berprestasi II Tingkat Universitas Andalas Tahun 2007 (SK Rektor No. 406/XIII/A/Unand-2007 tertanggal 20 Juni 2007), (3) Dosen Berprestasi Fakultas Pertanian Universitas Andalas Tahun 2007, dan (4) Dosen Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas yang perlu diberikan penghargaan pada Semester Ganjil TA 2010/2011, Padang, 9 Februari 2011.

Santosa pernah menjabat sebagai : (1) Sekretaris Program Studi Teknik Pertanian Jurusan Teknologi Pertanian Fakultas Pertanian Unand : 2003 – 2006, (2) Sekretaris Jurusan Teknologi Pertanian Fakultas Pertanian Unand : 2005 – 2008, (3) Ketua Program Studi Teknik Pertanian Jurusan Teknologi Pertanian Fakultas Pertanian Unand : 2006 – 2008, (4) Ketua Jurusan / Program Studi Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Unand : 2008 – 2010, (5) Sekretaris Jurusan / Program Studi Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Unand : 2010 – 2014, (6) Santosa menjadi Koordinator Program Studi Pascasarjana (S2) Teknologi Industri Pertanian pada Fakultas Teknologi Pertanian Unand pada tahun 2013-2014, dan (7) Terhitung mulai tanggal 27 Juni 2014 diangkat menjadi Dekan Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas.

Santosa menyediakan informasi makalah dan diktat (serta *home*) pada BLOG internet, dengan alamat <http://santosa764.wordpress.com>.



Omil Charmyn Chatib, S.TP, M.Si  
NIP. 19820527 201012 1003

Nomor Register Sertifikat Pendidik : 13100100603703

**Omil Charmyn Chatib**, merupakan putra ranah minang yang lahir di Padang, tanggal 27 Mei 1982. Omil menyelesaikan pendidikan Strata 1 (S1) di Program Studi Teknik Pertanian Fakultas Pertanian, Universitas Andalas pada tahun 2005. Pada tahun 2008 Omil menyelesaikan pendidikan Strata 2 (S2) di Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Pada bulan Desember 2010 hingga sekarang Omil tercatat sebagai Dosen pada Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas.